

Caracterización del uso/cobertura del suelo en Uruguay a partir de series temporales de imágenes MODIS

Baeza Santiago¹, Baldassini Pablo^{2,3}, Bagnato Camilo^{2,3}, Pinto Priscila², Paruelo José^{2,3}

¹*Departamento de Sistemas Ambientales, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Avenida Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: sbaeza@fagro.edu.uy*

²*Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección, IFEVA, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires*

³*Departamento de Métodos Cuantitativos y Sistemas de Información. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires*

Recibido: 20/5/14 Aceptado: 5/9/14

Resumen

La distribución espacial del uso/cobertura del suelo es el principal control de la dinámica de la energía, carbono y agua; tiene también enorme importancia en el monitoreo del ambiente y en la toma de decisiones del sector productivo. El objetivo de este trabajo fue desarrollar clasificaciones rápidas y de bajo costo del uso/cobertura del suelo en Uruguay. Las clasificaciones fueron realizadas mediante árboles de decisión, utilizando información fenológica de los diferentes usos/coberturas del suelo obtenida a partir series temporales de IVN- MODIS (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) (período: mayo 2011-marzo 2012), datos de campo e imágenes de alta resolución espacial (Landsat) para la identificación de lotes «puros» (pertenecientes a una única clase de uso/cobertura del suelo). Se clasificaron 1,7x10⁷ hectáreas, discriminando cuatro grandes categorías: Recursos Forrajeros Perennes, Forestación y Monte, Cultivos de Verano y Doble Cultivo. Estas ocuparon respectivamente el 63,6, 13,1, 14,3 y 7,4 % de la superficie cartografiada. La exactitud global del mapa fue alta (89,6 %) y la clase con menor exactitud fue Cultivos de Verano (85,8%). La clasificación realizada es una de las primeras descripciones de uso/cobertura del suelo que cubre todo el territorio uruguayo y que presenta altos niveles de exactitud. Los resultados muestran una disminución muy importante en los recursos forrajeros ocurrida en los últimos años fundamentalmente debido al avance de la frontera agrícola. El método utilizado es una alternativa rápida, repetible, evaluable y de bajo costo para describir el uso/cobertura del suelo sobre áreas extensas y monitorear su cambio a lo largo del tiempo.

Palabras clave: fenología de la vegetación, teledetección, IVN

Summary

Land Use/Land Cover Classification in Uruguay Using Time Series of MODIS Images

The spatial distribution of land use/land cover is the main control of energy, carbon and water dynamics; is also extremely important in environmental monitoring and decision-making in the agricultural sector. The objective of this work was to develop rapid and low cost land use/land cover classifications in Uruguay. We performed decision tree classifications using phenological information derived of NDVI-MODIS (Normal Difference Vegetation Index) time series (period: May 2011-March 2012), field data, and high spatial resolution images (Landsat) to identify «pure» agricultural lots (belonging to a single land use /land cover class). 1.7x10⁷ hectares were classified, discriminating four major categories: Perennial Forage Resources, Afforestation and Forest, Summer Crops, and Winter-Summer Crops; they occupied respectively 63.6, 13.1, 14.3 and 7.4 % of the mapped area. Overall map accuracy was high (89.6 %) and the less accurate class was summer crops (85.8 %). This classification is one of the first descriptions of land use/land cover for the entire Uruguayan territory with high levels of accuracy. The results show a very significant decrease in forage resources occurred in recent years mainly due to the advance of the agricultural frontier. The method used is a fast, repeatable, measurable and inexpensive alternative to describe land use/land cover over large areas and monitor its change over time.

Keywords: vegetation phenology, remote sensing, NDVI

Introducción

La descripción del uso/coertura del suelo es un insu-mo central para la generación de planes de uso y manejo de los recursos naturales, así como para planificar o pro-mover medidas destinadas a la conservación. Posee tam-bién una importancia central en la identificación, descripción y manejo de los recursos forrajeros a nivel nacional. La generación de un sistema de estimación de la productivi-dad de los recursos forrajeros en Uruguay requiere cono-cer, con un margen de error bajo y conocido, su ubicación en el espacio.

A pesar de la relevancia de cuantificar los cambios en el uso del suelo, las caracterizaciones de la cobertura/uso del suelo no suelen ser exhaustivas y las técnicas no se en-cuentran debidamente protocolizadas. En Uruguay y la re-gión existen pocos antecedentes de mapas de uso/cober-tura del suelo sobre grandes extensiones de territorio, y prácticamente no existen metodologías desarrolladas es-pecíficamente para describir el uso/coertura del suelo de manera rápida y con una estimación objetiva de los errores e incertidumbres. Un sistema que cuantifique la distribución de tipos de cobertura del suelo de manera eficaz es esen-cial para el análisis de los cambios en el mediano y largo plazo.

En los últimos años los sensores a bordo de satélites se han convertido en una herramienta ideal para caracterizar el uso/coertura del suelo sobre grandes extensiones de territorio (Townshend *et al.*, 1991), desde mapas locales con gran nivel de detalle (Clark *et al.*, 2004) hasta mapas globales de menor resolución espacial (DeFries *et al.*, 1998). La cobertura sinóptica, espacialmente continua y a interva-los regulares de tiempo que las imágenes de satélite obtie-nen de la superficie terrestre es la base de su amplio uso para la cartografía del uso y cobertura del suelo (Myneni *et al.*, 1997).

La capacidad de discriminar entre diferentes coberturas del suelo a partir de imágenes tomadas por satélite viene dada por la respuesta diferencial de los diferentes materia-les en diferentes porciones del espectro electromagnético (Curran, 1985). El uso de series temporales de imágenes permite inferir información sobre la fenología de la vegeta-ción (Guyot, 1990), generalmente aprovechando el com-portamiento espectral característico de la vegetación foto-sintéticamente activa en las porciones del espectro electro-magnético correspondientes al rojo e infrarrojo cercano. La vegetación fotosintéticamente activa absorbe prácticamen-te toda la radiación en la longitud de onda del rojo, a la vez que refleja una gran proporción de la longitud de onda del

infrarrojo cercano debido a la estructura de los tejidos folia-res. Este comportamiento característico ha llevado a la cons-trucción de índices de vegetación directamente relaciona-dos con el índice de área foliar, la actividad fotosintética o la productividad, a partir de la reflectancia en la longitud de onda del rojo (R) y el infrarrojo cercano (IR). El más común de ellos es el Índice de Vegetación de Diferencia Normaliza-da (IVN o NDVI, por sus siglas en inglés) ($IVN = IR - R / IR + R$). Numerosos trabajos han detectado relaciones directas en-tre el IVN y la fracción de radiación fotosintéticamente activa (fRFA) (Gallo *et al.*, 1985; Sellers *et al.*, 1992; Dye y Goward, 1993; Di Bella *et al.*, 2004) o la productividad primaria neta aérea (PPNA) (Tucker *et al.*, 1985; Box *et al.*, 1989; Prin-ce, 1991; Paruelo *et al.*, 1997, 2000; Piñeiro *et al.*, 2006).

Las clasificaciones de la vegetación a partir del IVN son bastante comunes en la bibliografía, estas separan diferen-tes tipos de vegetación a partir de la marcha estacional del IVN (Tucker *et al.*, 1985; DeFries *et al.*, 1995; Hansen *et al.*, 2000; Guerschman *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2008), apro-vechando las diferencias fenológicas en los diferentes tipos de vegetación. Por ejemplo, un bosque compuesto mayo-ritariamente por árboles de hoja perenne tendrá una activi-dad fotosintética (y valores de IVN) relativamente alta y es-table durante todo el año, mientras que un cultivo anual ten-drá una actividad fotosintética baja o nula durante la implan-tación del cultivo y luego de la cosecha, y un pico de creci-miento y máxima área foliar que dependerá del tipo de cul-tivo (invierno o verano, diferentes especies, condiciones de crecimiento, etc.). La mayor parte de estas clasificaciones utilizan series temporales muy largas de IVN, generalmen-te del sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Ra-diometer) a bordo de los satélites de la NASA de la serie NOAA (ver, por ejemplo: DeFries *et al.*, 1998; Hansen *et al.*, 2000). Estos satélites no fueron diseñados originalmen-te para el estudio de la tierra, por lo que poseen varios problemas de calibración geométrica y radiométrica (Goward *et al.*, 1991). En los últimos años, la puesta en órbita del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-ra-diometer) a bordo de los satélites TERRA y AQUA, espe-cialmente diseñados para el estudio de la superficie terres-tre, ha mejorado la capacidad de obtener información sobre la vegetación. Las imágenes de este satélite poseen mejor resolución espacial, exactitud geográfica y correcciones radiométricas y atmosféricas (Huete *et al.*, 2002), por lo que su uso ha ido en aumento a la hora de cartografiar el uso/coertura del suelo y sus cambios (Wesseles *et al.*, 2004; Wardlow *et al.*, 2007; Clark *et al.*, 2010, 2012). Guersch-man (2005) clasifica los principales cultivos de la región pampeana a partir de series temporales de IVN e introduce

el concepto de firma fenológica, entendido como la marcha anual del índice de vegetación en una estación de crecimiento de las diferentes clases de uso/cobertura del suelo.

A nivel regional, existen numerosos antecedentes de clasificación del uso y cobertura del suelo; estos pueden separarse en dos grandes grupos. Por un lado, existen descripciones parciales, de algunos miles de km², generalmente realizadas a partir de clasificaciones de imágenes de satélite de alta resolución espacial (Landsat, CBERS, etc.) (Guerschman *et al.*, 2003; Baldi *et al.*, 2006; Baldi y Paruelo, 2008; Baeza *et al.*, 2010, 2011). Por otro lado, existen clasificaciones realizadas a nivel global o continental, generalmente a partir de imágenes de satélite con baja resolución espacial y alta resolución temporal (AVHRR, SPOT-VEGETATION, etc.). Estas clasificaciones a gran escala son exhaustivas, en el sentido que cubren la totalidad del territorio, pero presentan inconsistencias con el conocimiento local sobre el uso y cobertura del suelo. Por ejemplo, DeFries *et al.* (1998), usando curvas temporales de IVN y datos de temperatura del sensor AVHRR, produjeron un mapa global con una resolución espacial de 8 x 8 km, en la cual la mayor parte de Uruguay fue clasificada como cultivos. Hansen *et al.* (2000) utilizando datos del mismo sensor pero con una resolución de 1 x 1 km, llegan a resultados similares. Eva *et al.* (2004) produjeron un mapa de uso/cobertura del suelo, para toda América del sur, con una resolución espacial de 1 x 1 km, principalmente a partir de datos del sensor SPOT-VEGETATION. En este trabajo la mayor parte de Uruguay es clasificada como estepas o agricultura.

Recientemente, un proyecto interinstitucional relevó la cobertura del suelo de todo el territorio nacional (Cal *et al.*, 2011). Este mapa está construido fundamentalmente por fotointerpretación de imágenes Landsat, correspondientes al periodo 2007-2008 de diferentes momentos del año en distintas porciones del territorio, por lo que sus resultados responden a más de una campaña agrícola y no cubren el continuo avance de la agricultura y forestación de los últimos años. La clasificación fue evaluada a campo exclusivamente para la cobertura/uso del suelo en grandes categorías, agrupando, por ejemplo, a los diferentes cultivos, las pasturas permanentes y la forestación en una única categoría (áreas terrestres cultivadas o manejadas). Por otro lado, la aplicación rutinaria de la metodología desarrollada en ese proyecto, que permita la evaluación de los cambios en el uso del suelo, sería altamente costosa tanto en recursos humanos como económicos.

El objetivo de este trabajo fue generar un mapa de uso/cobertura del suelo a nivel nacional a partir de series temporales de IVN-MODIS, llenando la brecha entre las dos grandes categorías de mapas arriba descritas, de manera de cubrir de forma continua todo el territorio nacional, e incorporando el conocimiento local para lograr un producto de mayor exactitud. Los objetivos específicos fueron: a) identificar la ubicación de los recursos forrajeros en la actualidad y evaluar su cambio ante el avance de la frontera agrícola; y b) presentar una metodología para la cartografía rápida, repetible, evaluable y de bajo costo, del uso/cobertura del suelo en grandes extensiones de territorio.

Materiales y métodos

Las clasificaciones realizadas implican la utilización de información fenológica de las diferentes coberturas/ usos del suelo obtenidas a partir de imágenes del sensor MODIS, la obtención de datos de «verdad terrestre» a partir de recorridos de campo, la digitalización de lotes «puros» (pertenecientes a una única clase de uso/cobertura del suelo), en imágenes de alta resolución espacial (Landsat), el cruce de dicha información y su clasificación a partir de árboles de decisión. La Figura 1 sintetiza los pasos realizados para la obtención del mapa.

Se utilizaron series temporales de IVN para evaluar el comportamiento estacional de la intercepción de radiación por las diferentes coberturas, un aspecto relacionado con la fenología de la vegetación. El comportamiento del IVN de un determinado píxel a lo largo de una estación de crecimiento es denominado «firma fenológica», ya que permite ver la dinámica de los cambios estacionales de la vegetación. Denominamos «Fenoteca Espectral» al conjunto de firmas fenológicas de diferentes coberturas derivadas de datos espectrales. Una «Fenoteca Espectral» es una base de datos donde cada registro corresponde a la firma fenológica de una determinada cobertura en una determinada situación (fecha de siembra, grado de fertilización, clima, pastoreo, etc.) (Bagnato *et al.*, 2012).

La Fenoteca Espectral utilizada para la clasificación fue construida a partir de la digitalización de 2753 lotes de diferentes usos/coberturas del suelo con información relevada a campo en nueve campañas de muestreo, realizadas durante la campaña agrícola 2011-2012 (Figura 2).

Los puntos de GPS con información de cobertura registrados a campo fueron superpuestos sobre imágenes de alta resolución espacial (Landsat 5 TM y/o Landsat 7 ETM) de forma de digitalizar con precisión los límites de cada lote.

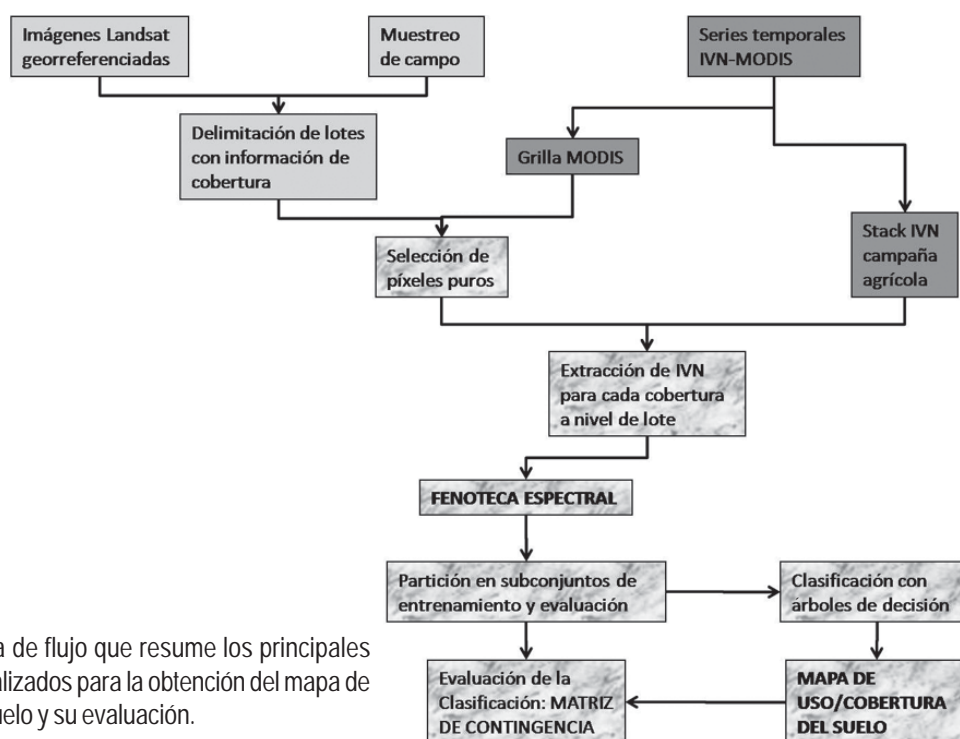


Figura 1. Diagrama de flujo que resume los principales insumos y pasos realizados para la obtención del mapa de cobertura/uso del suelo y su evaluación.

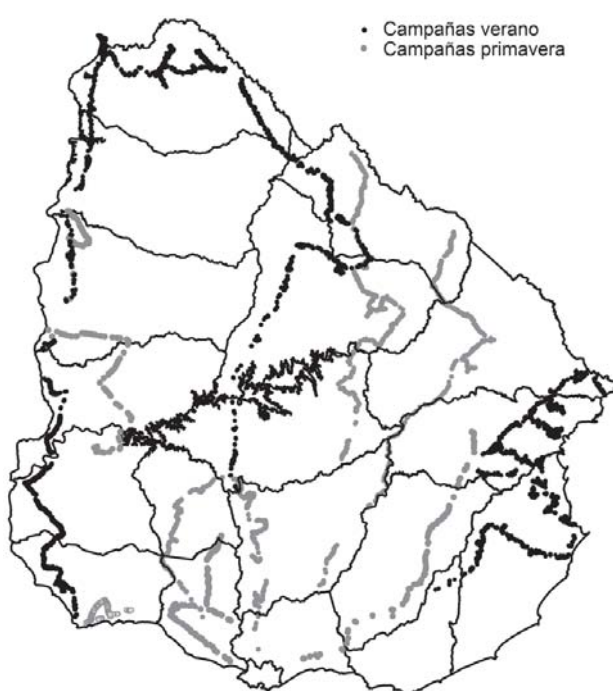


Figura 2. Recorridos de campo para el relevamiento de los diferentes usos/coberturas del suelo realizadas durante la campaña agrícola 2011-2012.

En todos los casos se seleccionó la imagen Landsat, libre de nubes, más cercana a la fecha de muestreo.

Los lotes con información de campo fueron superpuestos sobre imágenes de IVN-MODIS, de forma de extraer la información espectral para todos aquellos píxeles que quedaban completamente incluidos dentro de los lotes digitalizados (píxeles puros). Se utilizaron series temporales de imágenes de IVN-MODIS (producto MOD13Q1 «Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m» obtenido a través del Land Processes Distributed Active Archive Center: EOS Data Gateway) que fueron sometidos a un filtro de calidad, utilizando píxeles libres de nubes, sombras y con baja presencia de aerosoles en la atmósfera. La Figura 3 muestra un ejemplo de la extracción de píxeles puros en lotes agrícolas. La firma fenológica de cada uno de los lotes considerados corresponde al valor promedio de los valores de IVN de todos los píxeles completamente incluidos dentro del lote.

A partir de las firmas fenológicas de los diferentes lotes se construyó la Fenoteca Espectral para el territorio uruguayo. La Figura 4 muestra las firmas promedio para algunos de los usos/cobertura del suelo relevados. La Figura 5 muestra todas las firmas pertenecientes a la clase «Doble Cultivo» (un mismo lote utilizado dos veces en la misma

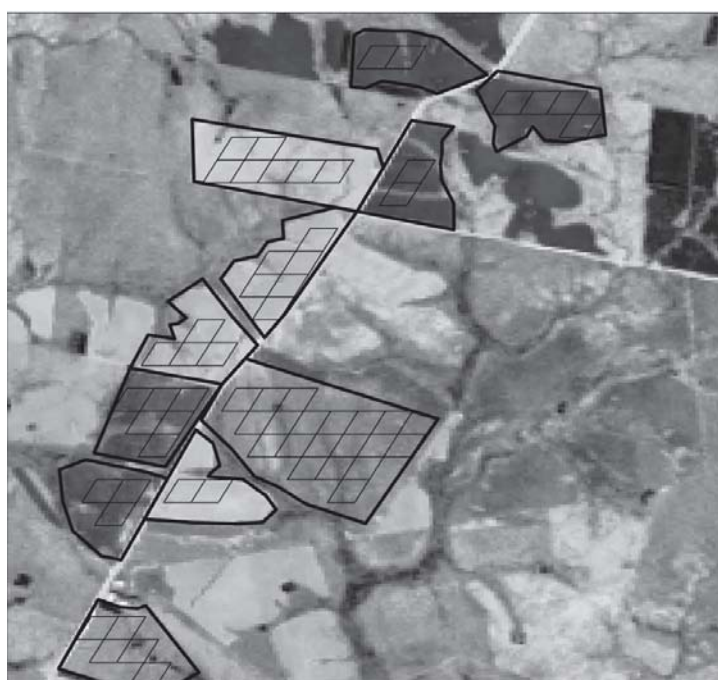


Figura 3. Ejemplo de los lotes digitalizados a partir de las recorridas de relevamiento de uso/cobertura del suelo con los píxeles MODIS completamente incluidos dentro de los lotes, superpuestos sobre una imagen Landsat 5 TM (RGB:432) de 24 de septiembre de 2011.

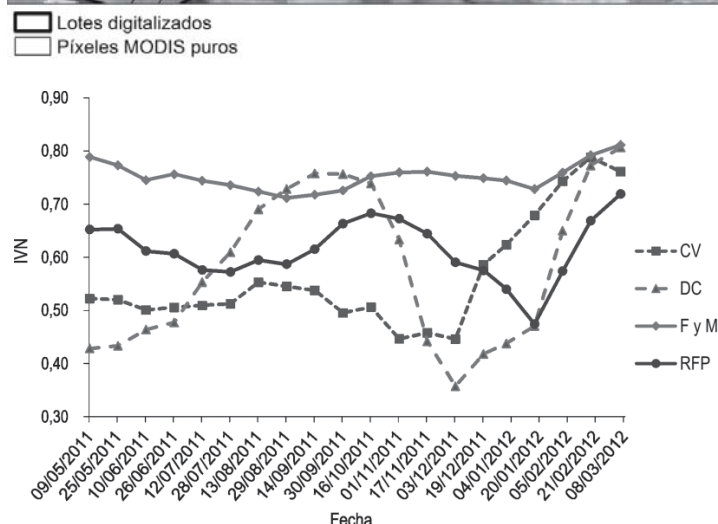
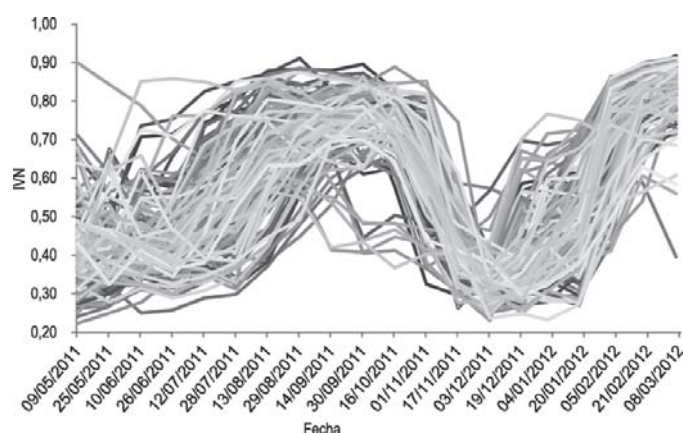


Figura 4. Firmas fenológicas promedio para algunos de los usos/coberturas del suelo analizados. Se muestran los valores promedio de IVN para cada intervalo de 16 días del producto MOD13Q1 del sensor MODIS (periodo 9/5/2011- 21/3/2012) CV: Cultivos de Verano (incluye verdeos y cultivos de verano), DC: Doble Cultivo (dos ciclos agrícolas por campaña, cultivos de invierno y verano y verdeos de invierno y verano), F y M: Forestación y Monte; RFP: Recursos Forrajeros Perennes (pastizales naturales, mejoramientos extensivos, pasturas implantadas).

Figura 5. Firmas fenológicas correspondientes a la clase «Doble Cultivo». Cada una de las firmas corresponde al promedio de IVN de todos los píxeles MODIS completamente incluidos dentro de cada lote para cada intervalo de 16 días del producto MOD13Q1 del sensor MODIS (periodo 9/5/2011- 21/3/2012).



campana agrícola, generalmente con un cultivo de invierno y otro de verano), dando cuenta de la variación espacial y temporal en las firmas fenológicas de cada una de las clases analizadas.

Las firmas fenológicas de la Fenoteca Espectral fueron utilizadas para la clasificación del uso/cobertura del suelo de todo el territorio uruguayo mediante la utilización de árboles de decisión. Esto implicó un proceso de dos pasos: en primer lugar, la generación del árbol de decisión mediante el software See5 y, en segundo lugar, la construcción del árbol y su aplicación mediante el uso del software Envi 4.7, un programa abocado al procesamiento digital de imágenes satelitales.

Para la construcción del árbol de decisión se usaron como variables explicativas todas las bandas con el valor de IVN de cada píxel (cada banda corresponde a un intervalo de adquisición de datos del sensor MODIS de 16 días) durante el período comprendido entre el 9 de mayo del 2011 y el 21 de marzo del 2012, y un conjunto de variables accesorias calculadas a partir de la serie temporal de IVN-MODIS. Algunas de las variables accesorias calculadas fueron: el valor promedio de IVN de la serie temporal (IVN-prom), el valor máximo (IVN-máx) y mínimo de IVN (IVN-mín), las fechas de máximo (F-máx) y mínimo (F-mín) valor de IVN, el rango en los valores de IVN (Rango), el valor mínimo en primavera (Min-Prim) y verano (Min-Ver),

el desvío estándar de toda la serie temporal (SD), y el desvío estándar en primavera (SD-Prim) y verano (SD-Ver). Estas variables accesorias resumen algunas características del comportamiento fenológico de las diferentes coberturas analizadas colaborando en su discriminación.

Se utilizó la información de IVN y variables accesorias de 1483 firmas espectrales para clasificar las diferentes categorías de cobertura/uso del suelo. El conjunto de datos fue dividido al azar en dos subconjuntos, uno de entrenamiento para generar el árbol de decisión y otro para evaluarlo de forma independiente. Se ensayaron diferentes particiones en los subconjuntos de evaluación-entrenamiento, diferentes combinaciones de variables explicativas y diferentes niveles de resolución conceptual (por ejemplo, diferenciando entre distintos cultivos de verano: soja, maíz, sorgo, etc.).

Los árboles generados mediante el software See 5 fueron implementados en el software Envi 4.7 de forma de generar mapas continuos de la cobertura/uso del suelo en Uruguay. Para generar la clasificación se utilizaron todas las imágenes de IVN correspondientes a Uruguay para el periodo comprendido entre 9 de mayo del 2011 y el 21 de marzo del 2012 y se calcularon las mismas variables accesorias descriptas más arriba. La Figura 6 muestra las reglas de decisión generadas por See5 e implementadas en ENVI

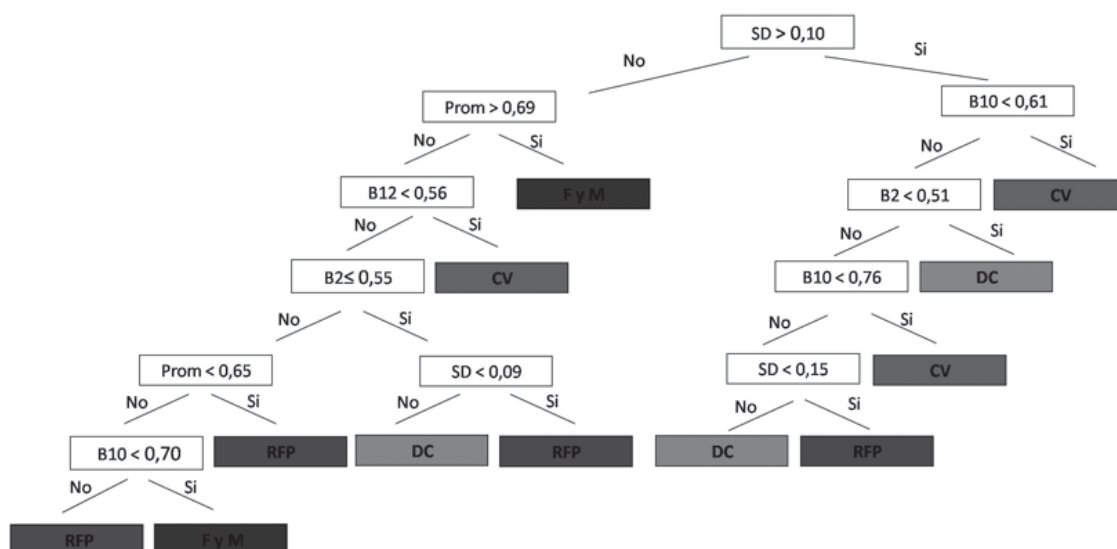


Figura 6. Árbol de decisión implementado en ENVI 4.7 a partir de las reglas de decisión generadas en See5. F y M: Forestación y Monte, CV: Cultivos de Verano, DC: Doble Cultivo; RFP: Recursos Forrajeros Perennes. B#: Bandas (intervalos de 16 días de IVN-MODIS; SD: Desvío estándar, Prom: Promedio de todas las bandas MODIS). Los números corresponden a valores de IVN. B2 corresponde a la fecha 10 de junio de 2011; B10 corresponde a la fecha 16 de octubre de 2011; B12 corresponde a la fecha 17 de noviembre.

Resultados y discusión

Se obtuvo una clasificación de la superficie total del territorio, con las siguientes clases: Cultivos de Verano (cultivos de verano de secano y bajo riego, verdes de verano), Doble Cultivo (dos ciclos agrícolas por campaña: cultivos de invierno y verano, verdes de invierno y verdes de verano), Recursos Forrajeros Perennes (pastizales naturales, mejoramientos extensivos y pasturas implantadas)

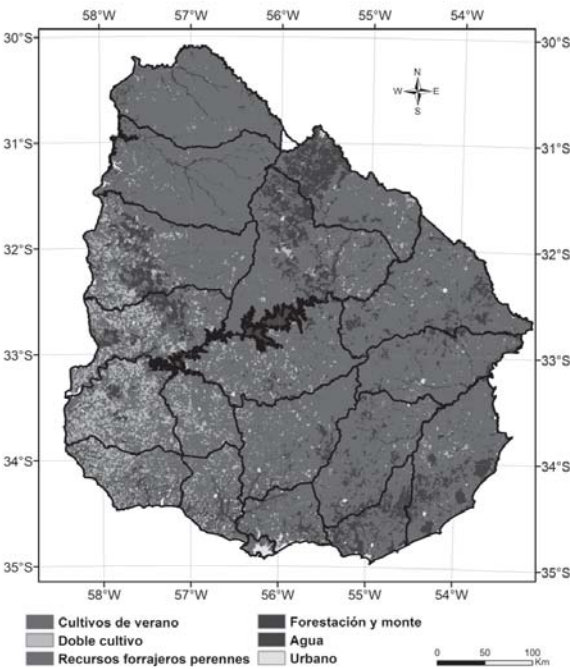


Figura 7. Mapa de uso/coertura del suelo en Uruguay obtenido mediante la clasificación de series temporales de imágenes de IVN-MODIS y árboles de decisión (El mapa en versión jpg color, puede ser bajado de <http://pastizales.fcien.edu.uy>. La versión raster puede solicitarse al primer autor).

Cuadro 1. Superficie cubierta por las diferentes categorías cartografiadas en hectáreas y en porcentaje del territorio nacional.

Clase	Área (ha)	Área
Cultivos de Verano	2.070.743	11,8
Doble Cultivo	1.230.451	7,0
Recursos Forrajeros Perennes	11.590.672	65,9
Forestación y Monte	2.063.677	11,7
Agua	535.285	3,0
Uso Urbano	97.479	0,6

Forestaciones y Monte Nativo. Además de estas cuatro categorías de uso del suelo, se incluyeron las categorías Agua y Uso Urbano, obtenidas del producto MODIS Land Cover Type (combined) MCD12Q1. La Figura 7 y el Cuadro 1 muestran el mapa generado y la superficie cubierta por cada categoría.

El mapa realizado presentó muy buenos niveles de acierto, con una exactitud global del 89,6 %, un coeficiente Kappa de 0,857 y errores de comisión y omisión relativamente bajos y equitativamente repartidos. El Cuadro 2 muestra la matriz de contingencia entre los resultados de la clasificación y la verdad terrestre (el subconjunto de evaluación de los datos relevados a campo). El Cuadro 3 muestra los errores de comisión (indica la proporción extra de la clase que se incluye en la clasificación) y omisión (indica la proporción de la clase que no está siendo incluida en la clasificación) de las diferentes clases cartografiadas. Los mapas generados con mayor resolución conceptual (incorporando tipos de coberturas y discriminando entre diferentes cultivos, verdes de cultivos, forestación de monte, pastizales naturales de pasturas implantadas) mostraron resultados con menores niveles de exactitud.

Cuadro 2. Matriz de contingencia entre los resultados de la clasificación y la información relevada a campo. CV: Cultivos de verano; DC: Doble cultivo; RFP: Recursos forrajeros perennes; FYM: forestación y monte.

Clases		Verdad Terrestre				
		CV	DC	RFP	FYM	Total
Clasificación	CV	85,8	11,9	7,3	0,6	31,1
	DC	5,8	87,2	1	0,8	16,1
	RFP	8,1	0,9	90	1,7	33,4
	FYM	0,2	0	1,8	96,9	19,4
	Total	100	100	100	100	100

Cuadro 3. Errores de comisión y omisión de la clasificación realizada expresados en pixeles y en porcentajes. CV: Cultivos de verano; DC: Doble cultivo; RFP: Recursos forrajeros perennes; FYM: forestación y monte.

Clases	Comisión (%)	Omisión(%)	Comisión (pix)	Omisión (pix)
CV	14,4	14,2	192/1338	189/1335
DC	14,3	12,8	99/693	87/681
RFP	8,9	10,0	128/1441	146/1459
FYM	3,5	3,1	29/837	26/834

La clasificación realizada es una de las primeras descripciones de uso/cobertura del suelo que cubre todo el territorio uruguayo y que presenta altos niveles de exactitud. Si bien el producto generado posee escasa resolución conceptual, da cuenta de forma espacialmente explícita del reciente fenómeno de agriculturización ocurrido en Uruguay en los últimos años, y el consecuente retroceso de la superficie con recursos forrajeros. En el último censo publicado por la Dirección de Estadísticas Agropecuarias - Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (DIEA, 2000), la

clase recursos forrajeros perennes (RFP) cubría en aquel momento, casi el 84% de la superficie censada (este porcentaje resulta de sumar las categorías del censo: campo natural, campo natural sembrado en cobertura, campo natural fertilizado y praderas implantadas). En cambio, en nuestra clasificación esa categoría cubre el 66 % del territorio. Esto implica una disminución de casi 20 puntos porcentuales de los RFP, fundamentalmente por aumento de la superficie bajo cultivos anuales y forestación (Figura 8). De los RFP, una parte importante son pasturas implanta-

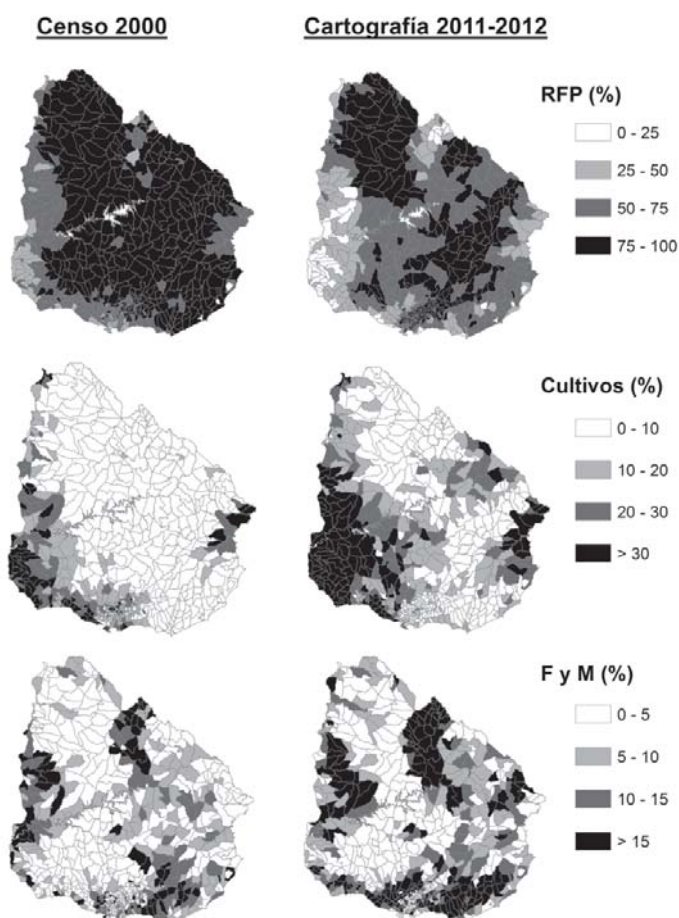


Figura 8. Comparación entre los datos del censo agropecuario del año 2000 (DIEA, 2000) y el resultado de la clasificación resumida a nivel de las unidades censales del censo agropecuario. Se muestra el porcentaje de cada categoría en cada unidad censal. RFP: Recursos Forrajeros Perennes, FYM: Forestación y Monte. A los efectos de la comparación la clase RFP involucra las categorías del censo del 2000: campo natural, campo natural sembrado en cobertura, campo natural fertilizado y praderas implantadas. La categoría cultivos involucra las categorías del censo: cultivos de huerta, cultivos cerealeros e industriales, cultivos forrajeros anuales, tierra arada, rastrojos; y en nuestra clasificación a las categorías Cultivo de Verano y Doble Cultivo. La clase F y M, incluye a las categorías del censo bosque natural y bosque artificial.

das (supongamos un 10 %), lo que implica un porcentaje de pastizales naturales en torno al 55 % del territorio, una cifra sensiblemente inferior al 71 % reportado en el censo del año 2000.

El mapa generado describe con un alto grado de exactitud (90 %) la ubicación de los recursos forrajeros perennes, sin embargo no permite discriminar entre diferentes tipos de recursos. El alto grado de variación existente en la fenología de los pastizales naturales (debida, por ejemplo, a la existencia de diferentes comunidades o diferencias en el manejo del pastoreo), los «mejoramientos» o las pasturas implantadas (debida, por ejemplo, al uso de diferentes especies /combinaciones de especies o al tiempo transcurrido desde la implantación del recurso), generó un importante solapamiento en las firmas fenológicas, que dificultó su separación. Debido al tipo de aproximación utilizada, algunos recursos forrajeros (verdeos de invierno y de verano) fueron incorporados dentro de rubros agrícolas. La variación en las fechas de siembra y/o las diferentes especies sembradas, tanto en los verdeos como en los diferentes cultivos, generó una gran variación en las firmas fenológicas, permitiendo únicamente la separación en grandes categorías (invierno-verano), sin permitirnos reconocer si ese cultivo estacional estaba destinado a su consumo por el ganado. El aumento del tamaño de las bases de datos de información de campo, con las consecuentes mejoras en la Fenoteca Espectral en el futuro, podría permitir la discriminación de estos recursos.

Aunque no existen en Uruguay productos similares que permitan una comparación formal, el análisis de otras fuentes de datos permite contrastar los resultados de esta clasificación. Para los cultivos de verano, nuestra clasificación reporta algo más de 2 millones de hectáreas, número que prácticamente duplica el área estimada con cultivos de verano en la encuesta agrícola primavera-verano 2011, de DIEA-MGAP. Estas diferencias son bastante menores si tenemos en cuenta que la encuesta agrícola de DIEA-MGAP no incluye en sus resultados al cultivo de arroz (cerca de 200.000 hectáreas en la última campaña) y que la categoría Cultivos de Verano en nuestra clasificación incluye también a los verdeos de verano. Según las declaraciones juradas de DICOSE, durante el 2011 hubo poco más de 500.000 hectáreas de cultivos forrajeros anuales.

En el caso de la categoría Doble Cultivo, nuestra clasificación reporta aproximadamente 1,2 millones de hectáreas. Si bien la categoría Doble Cultivo no existe en la encuesta agrícola de DIEA-MGAP, la superficie estimada con cultivos de invierno fue de algo más de 700 mil hectáreas. Según la información relevada a campo y analizada

a partir de sus firmas fenológicas, prácticamente en todos los lotes con agricultura de invierno (cultivos o verdeos) se realizó una siembra de verano (cultivo o verdeo). Si a las 700 mil hectáreas estimadas por DIEA-MGAP le sumamos las 500 mil hectáreas de cultivos forrajeros anuales declarados en la DICOSE, los valores absolutos para esta categoría son similares.

Recientemente, las estimaciones del área sembrada con los diferentes cultivos por parte de la encuesta agrícola de la DIEA, han sido cuestionadas. Hoffman *et al.* (2013) discuten las superficies reportadas por la encuesta, contrastando los resultados con otras fuentes de datos, fundamentalmente de la Oficina de Programación y Política Agropecuaria (OPYPA). Por ejemplo, Souto (2012a) estima una superficie sembrada con soja (a partir de los volúmenes exportados e importados, las existencias de granos y el rendimiento promedio por hectárea) de 1.151.000 ha, un número sensiblemente superior a las 876.000 ha reportadas por la encuesta agrícola. En el caso de los otros cultivos de verano importantes, maíz y sorgo, Methol (2012) calcula la superficie potencial sembrada a partir de la importación de semillas (considerando el maíz y sorgo tanto para grano seco, como para silos de grano húmedo). Estas estimaciones arrojan un área potencial sembrada de 146.560 ha para maíz (frente a las 124.000 reportadas por DIEA) y de 282.000 ha para sorgo (frente a las 88 mil reportadas por DIEA). Según los trabajos de OPYPA, estos tres cultivos de verano suman más de 1.500.000 hectáreas, un 50 % más que lo reportado por DIEA, y un número bastante más parecido a los resultados de nuestro mapa (sobre todo teniendo en cuenta que otros verdeos de verano, como la moha o el sudangrás, no están incluidos en esa superficie).

En el caso de los cultivos de invierno, Souto (2012b) estima una superficie sembrada (a partir del rendimiento promedio y de las exportaciones e importaciones de grano y harina) de 782.824 ha, un 40 % más que lo reportado por DIEA. Para la cebada, Hoffman *et al.* (2013) reportan las divergencias entre la Mesa Nacional de Entidades de Cebada Cervecera y la encuesta agrícola de la DIEA, que para la campaña agrícola 2011, reportaban 116.000 y 105.000 ha respectivamente. Sumando estos dos cultivos de invierno, las diferencias con la encuesta agrícola de la DIEA son cercanas al 30 %. En nuestra clasificación, la fase invierno de la categoría doble cultivo, incluye además verdeos de invierno relativamente importantes en términos territoriales, como el raigrás, la avena o el trigo forrajero. Las diferencias entre las estadísticas de DIEA y las de otras fuentes de datos reportadas por Hoffman *et al.* (2013) son

adjudicadas principalmente a dificultades en la metodología utilizada por la DIEA, donde el diseño muestral de la encuesta agrícola podría no estar captando los cambios de una agricultura especialmente dinámica y en crecimiento. Cabe resaltar que, además de estas diferencias, las categorías definidas en nuestro mapa incluyen una serie de cultivos, fundamentalmente verdeos, no incluidos en las cifras oficiales de la DIEA.

En nuestra clasificación, el área cubierta con forestación y monte nativo se encuentra cercana a los 2 millones de hectáreas. El último trabajo publicado por la Dirección Forestal (MGAP) reporta una superficie cubierta por bosques (naturales e implantados) de algo más de 1,7 millones de hectáreas según un relevamiento satelital realizado con imágenes del año 2004 (Echeverría, 2010). Una actualización de la cartografía forestal realizada por la Dirección Forestal con imágenes Landsat del 2011, muestra un descenso en esa superficie reportando algo más de 1,5 millones de hectáreas (Dirección Nacional Forestal, 2012). Nuestros resultados no sólo no marcan una disminución, sino un aumento en la superficie registrada con imágenes del año 2004.

Si comparamos el mapa resultante con la otra cartografía publicada a nivel nacional, el mapa generado por los ministerios de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP) y Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) (Cal *et al.*, 2011) reporta, a partir de imágenes de los años 2007 y 2008, algo más de 4,5 millones de ha de la categoría Áreas terrestres cultivadas y manejadas (categoría dominada por los cultivos, la forestación y las praderas implantadas). En nuestro trabajo, con imágenes de la campaña agrícola 2011-2012, la suma de las categorías Cultivos de Verano, Doble Cultivo y Forestación y Monte representa algo más de 5 millones de ha. Esta suma no incluye las pasturas implantadas que se encuentran en la categoría Recursos Forrajeros Perennes, mientras que la categoría Áreas terrestres cultivadas y manejadas no incluye el monte nativo, que sí queda incluido en nuestra categoría Forestación y Monte (imposibles de discriminar debido a la similitud de las firmas fenológicas).

Finalmente hay que tener en cuenta que, dada la reducida resolución conceptual de la clasificación presentada (solo cuatro categorías de uso/coertura del suelo), varios usos/coberturas del suelo marginales en términos territoriales pueden estar engrosando algunas de las categorías (horticultura, fruticultura, etc). Otro aspecto a tener en cuenta es que dada la resolución espacial utilizada (250x250 m), un número importante de píxeles cubre porciones del territorio con más de un uso del suelo, con respuestas fenológicas

inciertas y por tanto potenciales errores de clasificación. El último censo general agropecuario, actualmente en proceso, permitirá una comparación más exhaustiva y regionalizada con los resultados de nuestra clasificación.

Conclusiones

La clasificación realizada es una de las primeras descripciones de uso/coertura del suelo que cubre todo el territorio uruguayo y que presenta altos niveles de exactitud. Si bien el producto generado posee escasa resolución conceptual, da cuenta de forma espacialmente explícita del reciente fenómeno de agriculturización ocurrido en Uruguay en los últimos años, y el consecuente retroceso de la superficie con recursos forrajeros. La información generada es de gran utilidad tanto para la toma de decisiones en el sector agropecuario como para su uso como insumo en modelos de funcionamiento ecosistémico a nivel nacional.

El método utilizado en la generación de este mapa es una alternativa rápida, repetible, evaluable y de bajo costo para describir el uso/coertura del suelo sobre áreas extensas y para monitorear su cambio a lo largo del tiempo. Por otro lado, el protocolo de clasificación utilizado tiene el potencial de determinar el área sembrada con cultivos antes del final de cada zafra. En este trabajo utilizamos 20 fechas de imágenes MODIS, probablemente realizar las clasificaciones con 18 fechas no alteraría significativamente los resultados y permitiría contar con información del área sembrada a comienzos de febrero. Dicha información sería particularmente útil para generar pronósticos del volumen cosechado, planificar el almacenamiento o analizar la presión esperada sobre la infraestructura vial.

La ampliación continua de la Fenoteca Espectral en próximas campañas agrícolas, así como la inclusión en los árboles de decisión de otras variables ambientales (elevación, pendiente, tipo de suelo, etc.), podrían mejorar la resolución conceptual de los mapas generados, discriminando dentro de las categorías aquí cartografiadas.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por los proyectos INIA- FCI_01; CSIC Fortalecimiento Institucional, Sustentabilidad de los sistemas de Producción Agropecuaria; IAI CRN2031 y 3095, Convenio MGAP-Banco Mundial y con una beca de doctorado de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación.

Bibliografía

- Baeza S, Gallego F, Lezama F, Altesor A, Paruelo JM. 2011. Cartografía de los pastizales naturales en las regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas. En: Altesor A, Ayala W, Paruelo JM. [Eds.] Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Montevideo: INIA. (Serie FPTA; 26). pp. 33-54.
- Baeza S, Lezama F, Piñeiro G, Altesor A, Paruelo JM. 2010. Spatial variability of aboveground net primary production in Uruguayan Grasslands: A remote sensing approach. *Applied Vegetation Science*, 13: 72-85.
- Bagnato C, Conde C, Noe Y, Caride C, Baeza S, Paoli H, Vallejos M, Gallego F, Vale L, Amdan L, Elena H, Teixeira M, Mosciaro J, Ciuffoli L, Morales C, Baldassini P, Aguiar S, Arocena MD, Volante JN, Paruelo JM. 2012. Utilización de firmas espectrales de alta resolución temporal para la elaboración de mapas de uso agrícola y estimaciones de superficie cultivada a escala de lote en Argentina y Uruguay. En: Congreso Argentino de Teledetección; 18-21 setiembre, 2012; Cordoba, Argentina.
- Baldi G, Paruelo JM. 2008. Land-use and land cover dynamics in South American temperate grasslands [En línea]. *Ecology and Society*, 13(2): 6. Consultado 9 setiembre 2014. Disponible en: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art6/>.
- Baldi G, Guerschman JP, Paruelo JM. 2006. Characterizing fragmentation in temperate South America grasslands. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 116: 197-208.
- Box EO, Holbes BN, Kalb V. 1989. Accuracy of the AVHRR Vegetation Index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux. *Vegetatio*, 80: 71-89.
- Cal A, Álvarez A, Petraglia C, Dell' Aqua M, López N, Fernandez VM. 2011. Mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay = Land Cover Classification System. Montevideo: Mosca. 52p.
- Clark DB, Read JM, Clark ML, Cruz AM, Dotti MF, Clark DA. 2004. Application of 1-m and 4-m resolution satellite data to ecological studies of tropical rain forests. *Ecological Applications*, 14: 61-74.
- Clark ML, Aide TM, Riner G. 2012. Land change for all municipalities in Latin America and the Caribbean assessed from 250-m MODIS imagery (2001-2010). *Remote Sensing of Environment*, 126: 84-103.
- Clark ML, Aide TM, Grau R, Riner G. 2010. A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America. *Remote Sensing of Environment*, 114(11): 2816-2832.
- Curran PJ. 1985. Principles of remote sensing. London: Longman Scientific & Technical. 282p.
- DeFries RS, Hansen MC, Townshend JRG, Sohlberg RS. 1998. Global land cover classifications at 8 km spatial resolution: the use of training data derived from Landsat imagery in decision tree classifiers. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 3141-3168.
- DeFries R, Hansen MC, Townshend JRG. 1995. Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR Pathfinder data. *Remote Sensing of Environment*, 54: 209-222.
- Di Bella CM, Paruelo JM, Becerra JE, Bacour C, Baret F. 2004. Effect of senescent leaves on NDVI-based estimates of fAPAR: experimental and modelling evidences. *International Journal of Remote Sensing*, 25: 5415-5427.
- DIEA. 2000. SICA: Sistema de Información Censo Agropecuario 2000. [En línea]. Montevideo: MGAP. Consultado 12 setiembre 2014. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-sica,O,es,O,>
- Dirección Nacional Forestal. 2012. Superficie total de bosques (Cartografía 2012). [En línea]. Montevideo: MGAP. Consultado 12 setiembre 2014. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,dgf,dgf-recursos-forestal,O,es,O,MNU,E;134;2,MNU>
- Guerschman JP. 2005. Análisis regional del impacto de los cambios del uso de la tierra sobre el funcionamiento de los ecosistemas de la región pampeana (Argentina) [Tesis de Doctorado]. Buenos Aires: Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 130p.
- Guerschman JP, Paruelo JM, Di Bella C, Giallorenzi MC, Pacin F. 2003. Land cover classification in the Argentine Pampas using multi-temporal Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 24: 3381-3402.
- Guyot G. 1990. Optical properties of vegetation canopies. En: Clark JA, Steven MD [Eds.]. Applications of remote sensing in agriculture. London: Butterworths. pp. 19-44.
- Hansen MC, Defries RS, Townshend JRG, Sohlberg R. 2000. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 1331-1364.
- Hoffman E, Castro A, Arbeletche P. 2013. Área agrícola y superficie cultivada anualmente en Uruguay: implicancias de las diferencias en los números oficiales. *Cangué*, 35: 12-18.
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83: 195-213.
- Methol M. 2012. Maíz y Sorgo: situación y perspectivas. En: Anuario 2012 OPYPA. Montevideo: MGAP. pp. 137-148.
- Myneni RB, Keeling CD, Tucker CJ, Asrar G, Nemani RR. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. *Nature*, 386: 698-702.
- Paruelo JM, Oesterheld M, Di Bella CM, Arzadum M, Lafontaine J, Cahuepé M, Rebella CM. 2000. Estimation of primary production of sub-humid rangelands from remote sensing data. *Applied Vegetation Science*, 3: 189-195.
- Paruelo JM, Epstein HE, Lauenroth WK, Burke IC. 1997. ANPP estimates from NDVI for the central grasslands region of the U.S. *Ecology*, 78: 953-958.
- Piñeiro G, Oesterheld M, Paruelo JM. 2006. Seasonal variation in aboveground production and radiation-use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems*, 9: 357-373.
- Prince SD. 1991. Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981-1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 1301-1311.
- Sellers PJ, Berry JA, Collatz GJ, Field CB, Hall FG. 1992. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration Scheme. *Remote Sensing of Environment*, 42: 187-216.
- Souto G. 2012a. Oleaginosos y derivados: situación y perspectivas. En: Anuario 2012 OPYPA. Montevideo: MGAP. pp. 123-135.
- Souto G. 2012b. Trigo y derivados: situación y perspectivas. En: Anuario 2012 OPYPA. Montevideo: MGAP. pp. 101-113.
- Townshend JRG, Justice C, Li W, Gurney C, McManus J. 1991. Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future possibilities. *Remote Sensing of Environment*, 35: 243-255.
- Tucker CJ, Townshend JR, Goff TE. 1985. African land-cover classification using satellite data. *Science*, 227: 369-375.
- Wardlow BD, Egbert SL, Kastens JH. 2007. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for Crop Classification in the U.S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 108: 290-310.
- Wessels KJ, DeFries RS, Dempewolf J, Anderson LO, Hansen A J, Powell SL. 2004. Mapping regional land cover with MODIS data for biological conservation: Examples from the Great Yellowstone Ecosystem, USA and Para State, Brazil. *Remote Sensing of Environment*, 92: 67-83.
- Zhang X, Sun R, Zhang B, Tong Q. 2008. Land cover classification of the North China Plain using MODIS EVI time series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63: 476-484.